

## 基于模糊逻辑的移动机器人沿墙行为精准控制

袁宇龙\* 李 军

(重庆大学自动化学院,重庆 400044)

**摘要:**针对移动机器人自身的非线性和环境噪声的不确定性,设计了一个基于红外传感器的模糊控制器,并在实验环境中采用多项式拟合方法对红外传感器进行了校正,得到了传感器的校正模型,提高了移动机器人在室内环境中沿墙导航的精度。基于 KHEPERA II 移动机器人的实验结果表明,校正后的移动机器人在沿墙导航过程中具有更好的稳定性和鲁棒性,以及更高的效率。

**关键词:**模糊控制;传感器校正;沿墙导航;移动机器人

**中图分类号:**TP242 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1006-6055.2013.06.008

### Precision Control of Mobile Robot in Wall-following Behavior Based on Fuzzy Logic

YUAN Yulong\* LI Jun

(School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract:** In view of nonlinearity exist in mobile robot, as well as the uncertainty of environmental noise, a fuzzy controller based on infrared sensors is designed. In addition, the infrared sensors are calibrated with the method of polynomial fitting in the experimental environment and the calibration models are concluded. As a result, it improves the precision of wall-following navigation of the mobile robot in the indoor environment. Experiments on KHEPERA II mobile robot show that the performance of the mobile robot calibrated in the wall-following navigation is more stable and robust, as well as more efficient than the mobile robot uncalibrated.

**Key words:** fuzzy control; sensor calibration; wall-following navigation; mobile robot

## 1 引言

沿墙导航是移动机器人的一种基本行为,是指移动机器人在一定方向上,沿着物体轮廓运动并保持一定距离的行为。可以把它看成是移动机器人的一种低层智能行为,当它与高层智能行为结合在一起时,可以完成更复杂的任务<sup>[1,5]</sup>。在许多场合下,都要求机器人具有沿墙导航的能力<sup>[2]</sup>,如:障碍物的躲避、未知环境中的路径规划、同时定位与地图构建(SLAM)等。

目前,关于移动机器人沿墙导航问题已有许多研究。富志凯等<sup>[3]</sup>提出了一种基于传统控制方法的复合控制策略,通过 PID 控制算法与 Bang-Bang 控制算法的切换,实现移动机器人沿墙导航。由于传统的控制方法,在未知环境和非线性等条件下的自身局限性,导致控制器的稳定性较差。查峰等<sup>[4]</sup>提出了一种基于红外传感器的多模态沿墙导航控制策略,通过调节不同模态下的时间控制参数,实现了机器鼠沿墙导航。由于算法对时间控制参数的依赖性高,所以其鲁棒性较差。郭小琴等<sup>[5]</sup>提出了一种基于红外 PSD 的沿墙导航算法,由于没有考虑红外传感器自身的不足,如读数容易受到障碍物材质、颜色等的影响,所以实验得到的沿墙运动轨迹平滑性较差。王栋耀等<sup>[6]</sup>在 Pioneer 2DX 移动机器人平台上,采用声纳传感器作为环境感知设备,并基于有限状态机原理,提出了一种新的沿墙导航控制策略。由于未对声纳传感器固有的镜面反射造成的误差进行校准,所以沿墙实验得到的运动轨迹不平滑。I. GAVRILUT 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于两个红外传感器的沿墙导航控制策略,由于传感器太少,不能准确描述环境信息,因此算法可靠性差。上述算法各有特

点,但大多存在算法鲁棒性差,且未对传感器进行校正而造成运动轨迹不平滑等缺点。

本文针对移动机器人自身的非线性和环境噪声带来的不确定性,设计了一个基于红外传感器的模糊控制器,并在实验环境中对红外传感器进行了校正,得到红外传感器的校正模型。最后,将上述算法在 KHEPERA II 移动机器人上进行了实验,并获得了很好的沿墙导航效果。

## 2 模糊控制器的设计

### 2.1 模糊控制器的构建

模糊控制是一种智能控制方法,它的主要特点就是将具体值转化为模糊的语言变量,通过模仿人的思维推理过程来进行控制。一个模糊控制器主要包括模糊化、模糊推理和清晰化三个组成部分,其原理图如图 1 所示。对采集到的红外传感器数据进行简单的数据融合,得到左侧(SL)、前方(SF)和右侧(SR)三个方向上的离墙读数,并作为模糊控制器的输入。数据融合方程为式(1),其中  $S_i$  表示图 3 中对应红外传感器的读数, ( $i = 0, 1, \dots, 5$ )。模糊控制器的输出是移动机器人的左轮速度(LMS)和右轮速度(RMS)。

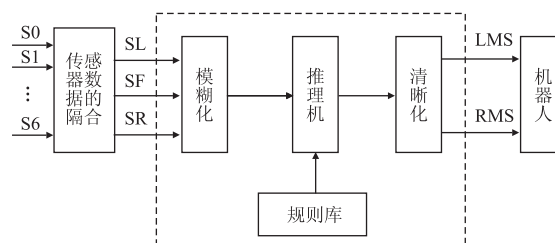


图 1 模糊控制器原理图

Figure 1 The schematic diagram of fuzzy controller

\* E-mail: shuiliu1989@sina.com; Tel: 15922609291

$$\begin{cases} SL = (S_1 + S_2)/2 \\ SF = (S_3 + S_4)/2 \\ SR = (S_5 + S_6)/2 \end{cases} \quad (1)$$

如图 1 所示,模糊控制器的输入首先要经过模糊化,将其转换成语言变量。然后推理机会根据推理模型,结合人工经验形成的 if-then 规则库,计算出当前输入情况下对应的输出语言变量。最后,经过清晰化过程,将输出语言变量转换为实际的数值。

2.2 模糊化

模糊化是具体的输入值经过隶属函数将其转换为隶属度为 0 到 1 的模糊变量的过程,通常用到的隶属函数有高斯隶属函数、三角隶属函数、梯形隶属函数、S 形隶属函数以及 Z 形隶属函数等。在本文中,模糊控制器的输入变量采用梯形隶属函数,输出变量采用三角隶属函数。由于规则库的体积会随着语言变量个数的增加而加倍的增大,因此,为了降低模糊计算的复杂度,模糊控制器的输入变量 SL、SF、SR 分别用{远,适中,近}三个语言变量来表示,控制器的输出变量 LMS、RMS 分别用{负大、负、慢、正常、快}五个语言变量来表示。模糊控制器的输入变量与输出变量的隶属度函数如图 2 所示。

2.3 模糊推理与知识库的设计

模糊推理是模糊控制的决策部分,主要通过人工经验形成的 if-then 规则库,推理得到输入对应的输出语言变量。本文中,知识库包含 18 条规则,如表 1 所示。对于每一条规则,其表现形式为:

If A is true, AND B is true, AND C is true Then D  
其中,用 AND 连接的部分为条件,当所有条件都满足时,则可以得到结果 D。AND 在数学意义上也可以用取小的概念来理解,每组输入向量相对于每条规则的隶属度则可以用式 (2)来表示:

$$q_k = \min \{ p_{1k}, p_{2k}, p_{3k} \} \quad (2)$$

其中,  $q_k$  是第  $k$  条规则的条件部分的连接度,  $p_{ik}$  是第  $i$  个输入对于第  $k$  条规则的隶属度,  $k = 1, 2, \dots, 18$ ;  $i = 1, 2, 3$ 。

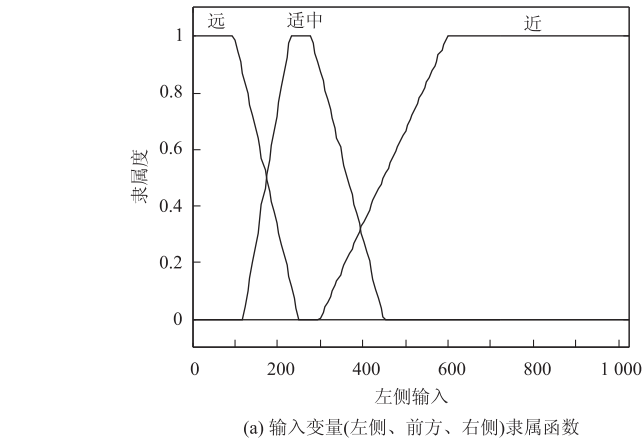


表 1 模糊控制规则表

Table 1 The rules of fuzzy controller

| 规则号 | 左侧 | 前方 | 右侧 | 左轮速度 | 右轮速度 |
|-----|----|----|----|------|------|
| 1   | 适中 | 远  | 适中 | 正常   | 正常   |
| 2   | 近  | 远  | 近  | 慢    | 慢    |
| 3   | 适中 | 远  | 近  | 慢    | 正常   |
| 4   | 近  | 远  | 适中 | 正常   | 慢    |
| 5   | 适中 | 远  | 远  | 慢    | 慢    |
| 6   | 近  | 远  | 远  | 快    | 负大   |
| 7   | 远  | 远  | 适中 | 慢    | 慢    |
| 8   | 远  | 远  | 近  | 负大   | 快    |
| 9   | 远  | 远  | 远  | 快    | 慢    |
| 10  | 适中 | 适中 | 远  | 正常   | 负    |
| 11  | 近  | 近  | 远  | 快    | 负大   |
| 12  | 近  | 适中 | 远  | 快    | 负    |
| 13  | 远  | 适中 | 适中 | 负    | 正常   |
| 14  | 远  | 近  | 近  | 负大   | 快    |
| 15  | 远  | 适中 | 近  | 负大   | 快    |
| 16  | 远  | 适中 | 远  | 负    | 正常   |
| 17  | 适中 | 适中 | 适中 | 负    | 负    |
| 18  | 近  | 近  | 近  | 负大   | 负大   |

2.4 清晰化

经过模糊推理得到模糊输出变量,把模糊输出转化为具体输出的过程称为清晰化。常用的清晰化方法有最大隶属度法,加权平均法和重心法。本文采用重心法,如式 (3) 所示。

$$V_L = \frac{\sum_{k=1}^{18} q_k v_{k,1}}{\sum_{k=1}^{18} q_k} \quad \text{与} \quad V_R = \frac{\sum_{k=1}^{18} q_k v_{k,2}}{\sum_{k=1}^{18} q_k} \quad (3)$$

其中,  $V_L$  和  $V_R$  分别表示经过重心法计算后得到的左右轮的具体速度,  $v_{k,1}$  和  $v_{k,2}$  分别表示第  $k$  条规则得到的左右轮速度的模糊输出。

3 算法实验

3.1 实验建立

实验是在 KHEPERA II 移动机器人上进行的,它是瑞士洛桑大学研发的一款小型移动机器人,被广泛应用于人工智能和机器学习领域,是一款常用的研究和教学工具<sup>[8]</sup>。它能

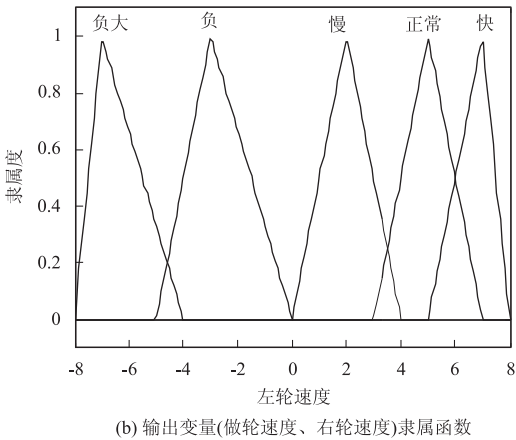


图 2 模糊控制器的隶属函数

Figure 2 The membership functions of fuzzy controller

在仿真环境和真实环境中完成路径规划、避障、传感器信息处理等智能行为。KHEPERA II 移动机器人配有 8 个光反射红外传感器,有效测距范围为 0 ~ 100 mm。它有两个差动轮,由直流电机来驱动,最大运行速度可以达到 1 m/s,其外观如图 3 所示。

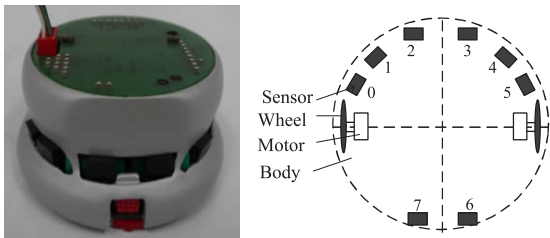


图3 KHEPERA II 移动机器人  
Figure 3 KHEPERA II mobile robot

在室内结构化环境中,我们常见的墙壁类型有直线墙、内拐角墙和外拐角墙。在不同的墙壁类型中,移动机器人的传感器读数变化有所不同。因此,我们设计了一个典型的综合实验场景,如图 4(a)所示,来对上述模糊控制器进行验证。实验中移动机器人的最大速度为 64 mm/s,采样时间为 0.1 s。

3.2 实验一

为了研究移动机器人在不同类型墙壁下的运行情况,移动机器人的初始位置为图中 A 所示,经过一段直墙运行到达 B,再转过一个内拐角墙壁到达 C,运行到 D 之后,再转过一个外拐角墙壁到达 F。移动机器人的右侧传感器读数变化曲线如图 4(b)所示。

从图 4(b)中可以看出,在 A 到 B 这段直墙中,移动机器人的运行轨迹波动不大。当转过 B 到 C 的内拐角墙壁时,移动机器人的读数出现了一个尖峰值,表明移动机器人此时距离墙壁非常近。此后读数迅速回落到读数平均值以下,这是由于控制转角过大,使得机器人离墙距离太远,经过缓慢调整,回到设定值附近。当转过 D 到 F 的外拐角墙壁时,由于转弯半径过大,使得机器人远离墙壁,从而造成读数的突然陡降。实验效果与文献[3-7]的结果一样,虽然移动机器人基本能够完成沿墙导航,但是运动轨迹的平滑性差。因此,

我们有必要对传感器的读数进行校正。

3.3 传感器的校正

KHEPERA II 移动机器人的外壳周围分布了 8 个光反射红外传感器,型号为 TCRT1000,其有效测量范围为 0 到 100 mm。传感器的输出不仅受到环境中自然光的影响,而且还与障碍物的材料,颜色以及其表面的反射性能有关。为了提高读数的可靠性,在实验环境中对每一个传感器进行了校正,步骤如下:

第一步:把机器人放置到使传感器  $S_{i=0}$  正对墙壁,且离墙距离为 5 mm 的地方;

第二步:读取此时的传感器读数  $S_j$ , ( $j = 1, 2, \dots, 10$ ),取十次读数的平均值作为本次测量的有效值,  $D_k = \frac{1}{10} \sum_j S_j$ ;

第三步:把机器人垂直后移 5 mm,  $k \leftarrow k + 1$ ,重复第二步的操作,直到  $k = 20$ ;

第四步:将测得的 20 组数据采用四次多项式拟合,得到相应的校正模型:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \tag{4}$$

其中,  $a_p$  为多项式的系数 ( $p = 0, 1, \dots, 4$ ),  $y$  为当前传感器的读数,  $x$  为当前传感器的离墙距离。

第五步:跳转到第一步,  $i \leftarrow i + 1$ ,用同样的方法,对其余七个传感器进行校正,得到对应的校正模型,直到  $i = 7$ 。

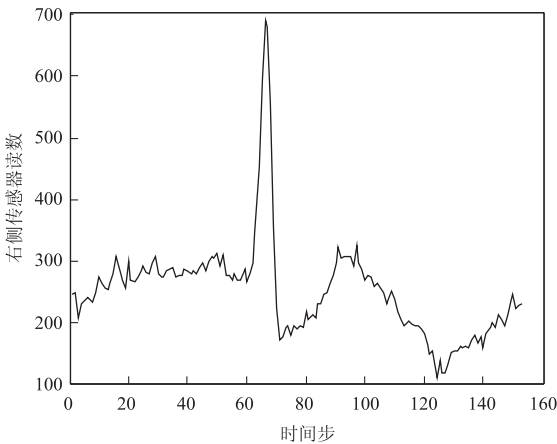
经过校正,最终得到每个传感器对应校正模型的多项式系数如表 2 所示。经过校正,每个传感器最终的校正曲线如图 5 所示。

表2 校正模型的多项式系数  
Table 2 Polynomial coefficients of calibration model

| <i>i</i> | <i>a</i> <sub>0</sub> | <i>a</i> <sub>1</sub> | <i>a</i> <sub>2</sub> | <i>a</i> <sub>3</sub> | <i>a</i> <sub>4</sub> |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0        | 1 423.5               | -67.956               | 1.318 8               | -0.011 2              | 0.000 03              |
| 1        | 1 430.2               | -71.191               | 1.464 9               | -0.013 2              | 0.000 04              |
| 2        | 1 410.1               | -90.052               | 2.245 1               | -0.024 1              | 0.000 09              |
| 3        | 1 401.5               | -90.263               | 2.279 3               | -0.024 6              | 0.000 09              |
| 4        | 1 468.9               | -79.317               | 1.718 8               | -0.016 2              | 0.000 05              |
| 5        | 1 505.5               | -88.503               | 2.069 8               | -0.020 9              | 0.000 07              |
| 6        | 1 417.9               | -91.791               | 2.314 9               | -0.024 9              | 0.000 09              |
| 7        | 1 406.7               | -89.919               | 2.248 7               | -0.024 1              | 0.000 09              |



(a) 实验场景图



(b) 机器人右侧传感器离墙距离读数

图4 模糊控制器的验证试验结果  
Figure 4 Experimental result of fuzzy controller

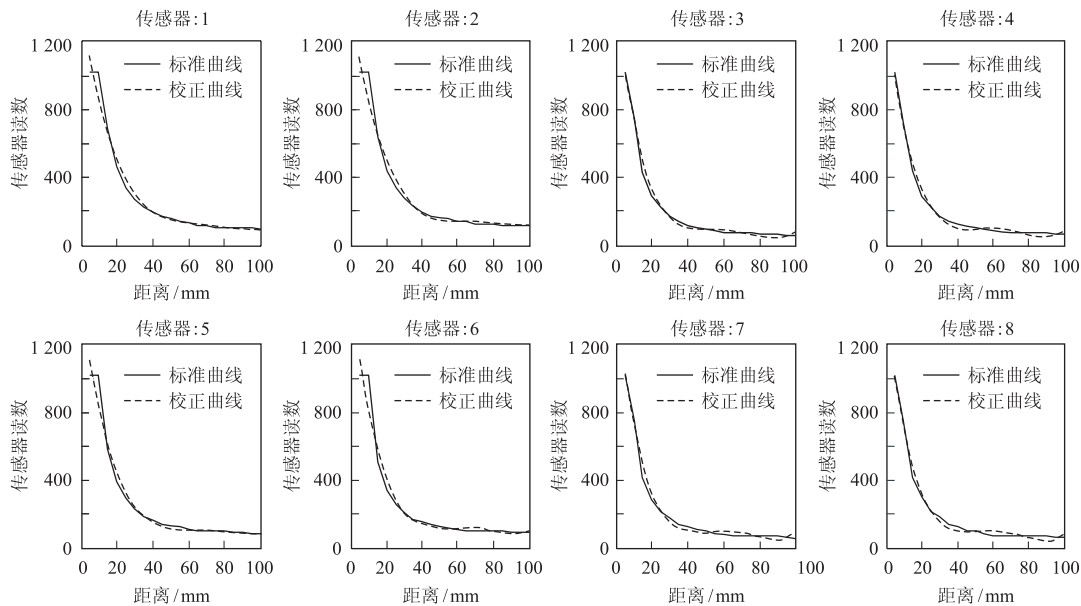


图 5 红外传感器的校正曲线  
Figure 5 The calibrated curve of infrared sensors

3.4 实验二

设机器人初始坐标为(40,30),初始方向角为0,离墙距离设为30 mm,分别采用未校正的模糊控制器、校正后的模糊控制器以及文献[3]中提出的复合控制算法对移动机器人进行导航控制,让其绕实验场景运行一周,得到其运动轨迹如图6所示。从图中明显可以看出,校正后的运动轨迹(实线表示)要比校正前的运动轨迹(划线表示)和复合控制算法的运动轨迹(点线表示)更加平滑,而且在整个运动过程中,离墙距离也更加稳定。由于在复合控制算法中,在内拐角处是通过 Bang-Bang 控制来转弯的,所以在转弯时会产生一个较大的转向角,从而造成轨迹不平滑。图7为移动机器人在运行过程中的方向角变化曲线,在直墙和外拐角墙情况下,机器人的方向角变化并不显著。但当机器人经过内拐角时,未校正的模糊控制的方向角和复合控制算法的方向角总会出现一个尖峰值,然后迅速回落,这样就造成机器人的调整幅度过大。相比之下,校正后的模糊控制的方向角变化则比较平缓,因此运动轨迹也会更平滑。并且,从图中还可以看出,校正后的模糊控制算法比另外两种算法的运行效率更

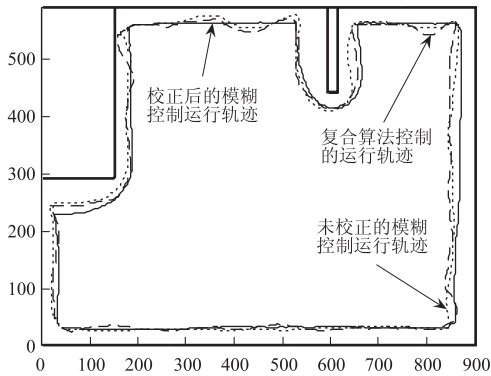


图 6 运动轨迹图  
Figure 6 Trajectory of mobile robot

高,移动机器人在校正后的模糊控制算法的控制下,运行一周花了630个时间步,约为63 s;在未校正的模糊控制算法的控制下,运行一周花了650个时间步,约为65s;在复合控制算法的控制下,运行一周花了710个时间步,约为71 s。此外,移动机器人在相应典型墙壁类型中的平均离墙距离如表3所示。从表3中可以看出,经过校正后,机器人在不同类别的墙体环境中都能保持较稳定的离墙距离,即运行鲁棒性更佳。

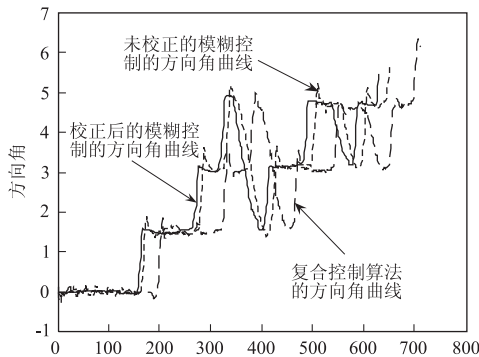


图 7 方向角变化曲线  
Figure 7 Variation of direction angle

表 3 平均离墙距离(单位:毫米)

| Table 3 The average distance to wall( Unit:mm) |       |       |       |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                                | 直墙    | 外拐角   | 内拐角   |
| 未校正的模糊控制算法                                     | 39.53 | 32.53 | 18.62 |
| 校正后的模糊控制算法                                     | 30.12 | 31.22 | 27.81 |
| 复合控制算法                                         | 36.34 | 31.56 | 22.64 |

4 结论

本文主要研究了移动机器人在室内环境的沿墙导航控制,设计了一个基于红外传感器的模糊控制器,并在实验环境中对红外传感器进行了校正,得到了红外传感器的模型,

根据传感器读数就能方便的得到实际的离墙距离值。将上述算法在 KHEPERA II 移动机器人上进行了导航实验。实验结果表明:校正后的移动机器人在沿墙导航过程中比校正前的效果更加平稳,而且用时更少,效率更高。但是,随着移动机器人智能化的要求越来越高,机器人的自主学习能力更加重要。已有相关研究将学习算法加入到了沿墙导航控制中<sup>[9,10]</sup>,因此,接下来我们拟采用强化学习来进一步优化控制算法。

参考文献

[1]刘晶,刘珏,陆雨花. 基于 FPGA-ARM 的视觉导航轮式机器人[J]. 计算机工程,2010,21(11):194-198.

[2]TURENNOUT P, HONDERD G, SCHELVEN L J. Wall-Following Control of a Mobile Robot. [C]. Proceeding s of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1992:280-285.

[3]富志凯,邢建春. 基于复合控制算法的移动机器人沿墙导航研究

[J]. 计算机应用与软件,2012,29(9):234-237.

[4]查峰,肖世德,冯刘中,等. 移动机器鼠沿墙导航策略与算法研究[J]. 计算机工程,2012,38(6):172-174.

[5]郭小琴,陈祝齐. 基于红外 PSD 的移动机器人沿墙导航控制[J]. 机床与液压,2009,37(9):133-136.

[6]王栋耀,马旭东,戴先中. 基于声纳的移动机器人沿墙导航控制[J]. 机器人,2004,26(4):346-350.

[7]GAVRILUT I, TIPONUT V, GACSADI A, et al. Wall-following method for an autonomous mobile robot using tow IR sensors[ C ]. the 12<sup>th</sup> WSEAS international conference on systems. 2008:205-209.

[8]K-Team Corporation. KH2User Manual 5. 02 [ EB/OL ]. ( 2001 ) [ 2012-10-15 ]. <http://ftp.k-team.com/khepera/documentation/Kh2UserManual.pdf>.

[9]徐明亮,柴志雷,须文波. 移动机器人模糊-Q 学习沿墙导航[J]. 电机与控制学报,2010,14(6):84-88.

[10]蒲兴成,曾凡海. 基于模糊神经网络算法的智能轮椅沿墙走行为研究[J]. 计算机工程与设计,2012,33(8):3 200-3 204.

作者简介

袁宇龙(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向:智能控制,机器人行为学习;

李军(1962-),男,副教授,主要研究方向:机器学习与自动控制,人工神经网络,移动机器人行为学习。

(上接第 693 页)

岩底板剪出的圆弧滑动;当采场距排土场边坡 80 m 时,复合边坡整体达到最优形态,矿区安全与经济效益得到兼顾。

2)复合边坡在自重与地应力作用下,坡面向临空面发生蠕变,内部产生剪切破坏,在坡面不稳定处发生隆起,最终,贯通形成圆弧状破坏面,沿坡面发生圆弧滑动。

3)极限平衡法简单、可靠,其与 FLAC3D 数值模拟相结合可弥补各自的不足,结果相互对比印证,便于复合边坡的优化设计。

参考文献

[1]谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京:科学出版社,1979.

[2]周中,傅鹤林. 土石复合体边坡人工降雨模拟实验研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1 392-1 396.

[3]韩书栋. 黄土沟壑地区岩-土复合边坡破坏模式分析及稳定性评价[D]. 西安:长安大学,2009.

[4]吕远强,董转运,姜海波,等. 水帘洞煤矿黄土高边坡的优化设计研究[J]. 工程勘察,2008,(11):23-27.

[5]中国煤炭建设协会. 煤炭工业露天矿设计规范[M]. 北京:中国计划出版社,2005.

[6]朱强,刘伟. 土-岩混合高边坡锚索加固前后稳定性分析[J]. 勘察科学技术,2007,(3):13-16.

[7]曹平,张科,汪亦显,等. 多层边坡破坏机制数值模拟研究[J]. 岩土力学,2011,32(3):87-94.

[8]王东,曹兰柱,朴春德,等. 露井联采逆倾边坡破坏模式及稳定性评价方法研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2011,22(3):33-36.

[9]曹兰柱,杨秀. 基于 FLAC3D 的黄土基底排土场边坡稳定分析[J]. 科技导报,2011,29(14):46-50.

[10]陈祖煜. 边坡稳定性分析极限平衡分析法的改进和应用[D]. 北京:清华大学,1991.

[11]张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994.

[12]林峰,黄润秋. 边坡稳定性极限平衡条分法的探讨[J]. 地质灾害与环境保护,1997,8(4):9-14.

[13]祝玉学,张绪珍,王国中. 露天矿边坡优化设计方法[J]. 岩土工程学报,1989,11(3):11-22.

[14]张利洁,黄正加,雷普. FLAC3D 在边坡岩体稳定性分析中的应用[J]. 岩土力学,2005,26(Supp):61-64.

作者简介

陈鹏(1975-),男,博士,教授,主要研究方向:矿业系统优化,露井联采,边坡稳定;

周志伟(1987-),男,硕士,主要研究方向:露天矿系统优化与边坡稳定;

曹兰柱(1961-),男,博士,教授,主要研究方向:矿业系统优化与边坡稳定。